



TUGAS AKHIR TF-141581

ANALISIS VARIASI SUSUNAN PIPA PADA
DESAIN ECONOMIZER DENGAN
MENGGUNAKAN METODE *COMPUTATIONAL
FLUID DYNAMICS* (CFD)

CHUSNUL KHOTIMAH
NRP. 2412 100 029

Dosen Pembimbing
Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D
Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.

JURUSAN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT TF-141581

AN ANALYSIS OF VARIOUS TUBE ARRAYS ON DESIGNING ECONOMIZER USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD) METHODS

CHUSNUL KHOTIMAH

NRP. 2412 100 029

Supervisor

Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D

Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS

Faculty of Industrial Technology

Sepuluh Nopember Institute of Technology

Surabaya 2016

**ANALISIS VARIASI SUSUNAN PIPA PADA DESAIN
ECONOMIZER DENGAN MENGGUNAKAN METODE
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)**

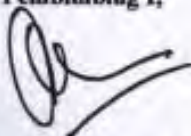
Tugas Akhir

Oleh :

Chusnul Khotimah
NRP. 2412 100 029

Surabaya, 14 Juli 2016
Mengetahui dan Menyetujui.

Pembimbing I,



Gunawan Nugrobo, ST., MT., Ph.D
NIP. 19771127 200212 1 002

Pembimbing II ,



Nur Laila Hamidah, ST., M.Sc
NIP. 19880710 201504 2 001

Kelas Jurusan
Teknik Fisika - FEI-ITS



Agus Muhammad Hatta, ST., M.Si., Ph.D
NIP. 19780902 200312 1 002

**ANALISIS VARIASI SUSUNAN PIPA PADA DESAIN
ECONOMIZER DENGAN MENGGUNAKAN METODE
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)**



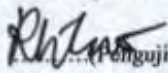


TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Fisika
pada
Bidang Studi Rekayasa Energi
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

CHUSNUL KHOTIMAH
NRP. 2412 100 029

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Gunawan Nugroho, ST., MT., Ph.D. .....(Pembimbing I)
2. Nur Laila Hamidah, ST., M.Sc .....(Pembimbing II)
3. Dr. Ridho Hantoro, ST., MT. .....(Penguji I)
4. Ir. Roekmono, MT .....(Penguji II)
5. Harsono Hadi, Ph.D .....(Penguji III)

**SURABAYA
JULI 2016**

ANALISIS VARIASI SUSUNAN PIPA PADA DESAIN ECONOMIZER DENGAN MENGGUNAKAN METODE COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)

Nama Mahasiswa : Chusnul Khotimah
NRP : 2412 100 029
Jurusan : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Gunawan Nugroho, S.T.,M.T.,Ph.D
Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.

Abstrak

Heat Exchanger merupakan alat yang digunakan dalam proses perpindahan panas antara dua fluida yang memiliki perbedaan temperatur dan dipisahkan oleh dinding-dinding. Penerapan heat exchanger diantaranya pada insudtri pembangkit,air conditioning, dan pada proses kimia. Didalam industri pembangkit listrik salah satu penerapan heat exchanger adalah economizer. Economizer memanfaatkan gas buang yang dihasilkan exhaust pada boiler. Dengan memanfaatkan kembali gas buang dapat menghemat konsumsi bahan bakar. Agar economizer dapat menghasilkan koefisien perpindahan panas yang besar dapat dilakukan variasi pada susunan pipa yang ada di economizer. Ada dua variasi susunan pipa pada economizer yaitu susunan aligned dan staggered. Jarak longitudinal pitch (S_L) dan transversal pitch (S_T) juga mempengaruhi. Pada penelitian tugas akhir ini dilakukan simulasi susunan pipa economizer dengan menggunakan metode Computational Fluid Dynamic (CFD) untuk mengetahui koefisien perpindahan panas. Dari hasil simulasi didapatkan bahwa nilai koefisien perpindahan panas terbaik ada pada susunan staggered dengan variasi jarak 55/60 sebesar $143 \text{ W/m}^2\text{K}$. Hal ini dikarenakan pada variasi 55/60 memiliki celah transversal lebih kecil. sehingga perpindahan panas yang terjadi lebih optimal bila dibandingkan dengan susunan aligned.

Kata kunci: *economizer, susunan staggered dan aligned, koefisien perpindahan panas.*

AN ANALYSIS OF VARIOUS TUBE ARRAYS ON DESIGNING ECONOMIZER USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD) METHODS

Name : Chusnul Khotimah
NRP : 2412 100 029
Department : Teknik Fisika FTI-ITS
Supervisor : Gunawan Nugroho, S.T.,M.T.,Ph.D
Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.

Abstract

Heat exchanger are devices that is used in the process of exchanging heat between two fluids which have temperature difference and are separated by a solid wall. Heat exchangers are commonly used in the power plant industries, air conditioners, and in chemical process industries. The most well known type of heat exchangers in the power plant in the power plant industries is an economizer. Economizers utilize waste heat in the exhaust gas of boiler so that industries can cut fuel costs. A previous study has carried out that varies configuration of tubes in the economizers perform a high heat transfer coefficients. There are two types of tube configurations i.e aligned and staggered. Moreover, the distance between longitudinal pitch (S_L) and transversal pitch (S_T) affects the heat transfer coefficients. This study carry out an optimum number of heat transfer coefficients performed by simulation varies arrays of tubes in economizers using Computational Fluid Dynamics (CFD). It is found in the simulation that the optimum heat transfer coefficients is $143 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ of straggered arrays for a given distance 55/60. In conclusion, straggered arrays exhibits better performance than aligned arrays.

Keywords : *economizer, staggered dan aligned arrays, heat transfer coefficients*

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
COVER	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 <i>Heat Exchanger</i>	5
2.2 Aliran Eksternal Fluida	6
2.3 Konveksi <i>Heat and Mass Transfer</i>	8
2.4 Aliran Fluida Melintasi <i>Tube banks</i>	9
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	15
3.1 Skema Diagram Alir Penelitian	15
3.2 Pengumpulan Data Masukan Parameter Desain	16
3.3 Perhitungan jarak <i>transverse pitch</i> dan <i>longitudinal pitch</i>	16
3.4 Simulasi Desain <i>Economizer</i>	17
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	25
4.1 Analisis Pengaruh Susunan Tube aligned dan staggered Terhadap Kecepatan Aliran	25
4.2 Pengaruh Susunan <i>Tube</i> Serta Variasi Jarak S_L/S_T Terhadap <i>Reynold Number</i>	32
4.3 Pengaruh Susunan <i>Tube</i> Serta Variasi Jarak S_L/S_T Terhadap Koefisien Perpindahan Panas	34

4.4 Analisis Pengaruh Susunan <i>Tube Aligned</i> Dan <i>Staggered</i> Terhadap Distribusi Suhu	35
4.5 Perhitungan <i>Overall Heat Transfer coefficient</i>	39
4.6 Analisis <i>Pressure drop</i> pada <i>tube banks</i>	40
4.7 Pembahasan.....	42
BAB V PENUTUP	45
5.1 Kesimpulan.....	45
5.2 Saran	45
DAFTAR PUSTAKA.....	47
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	<i>Boundary layer</i> dan separasi pada silinder sirkular di <i>cross flow</i>	6
Gambar 2.2	Profil kecepatan pada dinding silinder	7
Gambar 2.3	Pengaruh turbulensi terhadap separasi	7
Gambar 2.4	<i>Nusselt Number Local</i> untuk aliran udara secara normal pada silinder sirkular	8
Gambar 2.5	Skema <i>tubebank</i> dengan aliran yang melintasi <i>tube</i>	9
Gambar 2.6	Susunan <i>tubebanks</i> (a) <i>Aligned</i> (b) <i>Staggered</i>	10
Gambar 2.7	Kondisi aliran pada susunan (a) <i>Aligned</i> dan (b) <i>staggered</i>	11
Gambar 2.8	Faktor gesekan dan faktor koreksi pada susunan pipa <i>aligned</i>	12
Gambar 2.9	Faktor gesekan dan faktor koreksi pada susunan pipa <i>staggered</i>	12
Gambar 3.1	Skema diagram alir penelitian	14
Gambar 3.2	Geometri untuk susunan <i>tube aligned</i> (a) dan <i>staggered</i> (b).....	16
Gambar 3.3	Domain susunan pipa <i>aligned</i> (a) dan <i>staggered</i> (b)	17
Gambar 3.4	Hasil <i>Meshing</i>	18
Gambar 3.5	<i>Meshing</i> secara keseluruhan	18
Gambar 3.6	<i>Iterations</i>	21
Gambar 4.1	Distribusi kecepatan pada susunan <i>aligned</i> dengan jarak S_L/S_T (a) 5560 (b) 5580 (c) 6065 (d) 6080	24
Gambar 4.2	Grafik Kecepatan Maksimal pada susunan <i>tube Aligned</i>	25
Gambar 4.3	Visualisasi vektor kecepatan pada susunan <i>aligned</i> 55/60	26

Gambar 4.4	Distribusi kecepatan pada susunan <i>staggered</i> dengan jarak S_L/S_T (a) 5560 (b) 5580 (c) 6065 (d) 6080.....	28
Gambar 4.5	Grafik kecepatan maksimal pada susunan <i>tube Staggered</i>	28
Gambar 4.6	Visualisasi kecepatan vektor pada susunan <i>staggered</i> dengan varias jarak 55/60	29
Gambar 4.7	Pengaruh susunan <i>tube aligned</i> dan <i>staggered</i> serta jarak S_L/S_T terhadap <i>Reynold Number</i>	31
Gambar 4.8	Pengaruh susunan <i>tube aligned</i> dan <i>staggered</i> serta jarak S_L/S_T terhadap koefisien perpindahan panas.....	32
Gambar 4.9	Distribusi suhu pada susunan <i>aligned</i> dengan jarak S_L/S_T (a) 5560 (b) 5580 (c) 6065 (d) 6080.....	34
Gambar 4.10	Grafik suhu <i>outlet</i> pada susunan <i>aligned</i> dengan jarak S_L/S_T 5560, 5580, 6065, 6080.....	35
Gambar 4.11	Distribusi suhu pada susunan <i>Staggered</i> dengan jarak S_L/S_T (a) 5560 (b) 5580 (c) 6065 (d) 6080.....	37
Gambar 4.12	Grafik suhu outlet pada susunan <i>staggered</i> dengan jarak S_L/S_T 5560, 5580, 6065, 6080.....	37

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Konstanta untuk persamaan silinder pada <i>cross flow</i>	9
Tabel 3.1	Data parameter masukan desain <i>economizer</i>	14
Tabel 3.2	Geometri <i>cylinder tube banks</i> susunan <i>Aligned</i> dan <i>staggered</i>	17
Tabel 3.3	Hasil Simulasi <i>Meshing</i>	19
Tabel 3.4	Parameter <i>boundary condition</i>	19
Tabel 3.5	Properties fluida (Gas Ideal)	20
Tabel 4.1	Hasil perhitungan <i>overall heat transfer</i> <i>coefficient</i> (U)	39
Tabel 4.2	Hasil perhitungan <i>overall heat transfer</i> <i>coefficient</i> (U)	40
Tabel 4.3	komparasi nilai dari seluruh variasi	43

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Heat exchanger merupakan alat yang digunakan dalam proses perpindahan panas antara dua fluida yang memiliki perbedaan temperatur dan dipisahkan oleh dinding-dinding. Penerapan *heat exchanger* diantaranya pada industri pembangkit listrik, *air conditioning*, pemanfaatan panas yang terbuang dalam proses kimia (Incropera&Dewitt,1990). Didalam industri pembangkit listrik salah satu penerapan *heat exchanger* adalah *economizer*. *Economizer* berfungsi untuk meningkatkan suhu air sebelum masuk kedalam *boiler*. *Economizer* memanfaatkan panas buang yang dihasilkan *exhaust* pada *boiler*. Dengan memanfaatkan kembali gas buang dapat menghemat konsumsi bahan bakar. Peningkatan efisiensi *boiler* karena adanya pemasangan *economizer* adalah 2% hingga 4% tergantung dari rata-rata pembakaran (Ravindra,2012). Hasil perhitungan didapat bahwa gas buang dapat menaikkan efisiensi *boiler* sebesar 1.7 %. (murni,2011)

Pada *economizer* ada banyak faktor yang mempengaruhi efisiensi kinerja *economizer*, salah satu diantaranya adalah *tube* (*tube*). *Tube* memiliki fungsi sebagai tempat mengalirnya fluida. Ada dua tipe susunan pada *tube* yaitu tipe *aligned* dan *staggered*. Aliran fluida yang terjadi pada kedua susunan *tube* memiliki perbedaan. Aliran fluida eksternal yang mengalir pada sisi permukaan *tube* sehingga timbul karakteristik aliran didaerah sekitar *tube*. Selain aliran fluida eksternal juga terjadi aliran fluida di sisi dalam *tube*. Aliran yang terjadi disekitar *tube* pada baris awal *tubebank* serupa dengan *single-cylinder* didalam *cross flow*. Oleh karena itu, koefisien perpindahan panas pada *tube* didalam baris pertama kurang lebih sama dengan *singletube* pada *cross flow*. Untuk baris *downstream*, kondisi aliran tergantung pada susunan dari *tubebank*.

Pada susunan *tube aligned*, barisan awal merupakan barisan *upstream*. Untuk mencukupkan nilai S_L dengan cara

menggabungkan *upstream* dan *downstream* atau dengan menambah turbulansi aliran. Koefisien konveksi dalam suatu baris akan naik dengan bertambahnya baris. Jumlah baris yang digunakan untuk menaikkan koefisien konveksi adalah 5 baris. Namun diperlukan perubahan aliran agar nilai koefisien konveksi berubah. Untuk S_L yang panjang berpengaruh pada baris *upstream* yang menurun, dan perpindahan panas didalam baris *downstream* tidak bertambah. Oleh karena itu, pada *aligned tube* perbandingan antara S_T dan S_L kurang dari 0.7 tidak diharapkan. Sedangkan pada susunan *tube staggered*, arah aliran yang terjadi berkelok, dan bercampur dengan *crossflow* sehingga akan relatif meningkat dibandingkan dengan susunan *aligned tube*. Secara umum, peningkatan perpindahan panas yang baik melalui banyak kelok aliran seperti pada susunan *staggered tube*. Namun teori ini ditujukan untuk *Reynold Number* kecil yaitu kurang dari 100 (Incropera & Dewitt, 1990).

Pada penelitian ini penulis akan menganalisa perilaku perpindahan panas pada sisi luar *tube economizer* dengan susunan *Aligned* dan *Staggered* serta variasi pada *transversal pitch* dan *longitudinal pitch*.

1.2 Permasalahan

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan diatas, maka perumusan masalah yang akan diangkat untuk mengarahkan penelitian Tugas Akhir ini yaitu:

1. Bagaimana pengaruh susunan *tube Aligned* dan *Staggered* serta variasi jarak *transversal pitch* dan *longitudinal pitch* pada *economizer* terhadap distribusi kecepatan dan suhu pada sisi luar *cylinder tube* dengan menggunakan *computational fluid dynamic* (CFD)?
2. Bagaimana menganalisis koefisien perpindahan panas secara keseluruhan pada sisi luar *cylinder tube*?

1.3 Tujuan

Tujuan penulisan tugas akhir ini sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh susunan *tube Aligned* dan *Staggered* serta variasi jarak *transversal pitch* dan *longitudinal pitch* pada *economizer* terhadap distribusi kecepatan dan temperatur pada sisi luar *cylinder tube* dengan menggunakan *computational fluid dynamic* (CFD).
2. Menganalisis koefisien perpindahan panas pada sisi eksternal *cylinder tube*.

1.4 Batasan masalah

Untuk memfokuskan penyelesaian masalah pada penelitian tugas akhir maka batasan masalah yang diangkat adalah sebagai berikut :

1. Pemodelan geometri *cylinder tube* dengan susunan *aligned* dan *Staggered* dengan domain aliran dua dimensi.
2. Simulasi untuk mengetahui profil aliran menggunakan *Computational fluid Dynamic* dengan persamaan *Reynold Stress Model* (RSM).
3. Aliran pada alat penukar panas adalah *steady-flow*, *incompresble flow* dan *uniform* pada sisi *inlet*.
4. *Boundary condition* pada sisi inlet berupa *velocity inlet* dan pada sisi *outlet* berupa *outflow*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Heat Exchanger*

Heat exchanger merupakan alat penukar panas yang digunakan sebagai penukar energi panas antara dua atau lebih fluida dengan suhu fluida berbeda. Pada umumnya didalam *heat exchanger*, fluida dipisahkan dengan permukaan perpindahan panas dan secara ideal tidak bercampur. Beberapa jenis *heat exchanger* yang sering digunakan adalah *Shell and Tube heat exchanger*, *Double-pipe Heat exchanger* dan *Compact Heat exchanger*. Aplikasi dari *heat exchanger* ini ada di berbagai bidang diantaranya pada industri proses, pembangkit listrik, *petroleum*, transportasi, pendingin ruangan dan sebagainya. Dalam proses pembangkit *heat exchanger* banyak ditemui beberapa komponen, salah satunya adalah *economizer*.

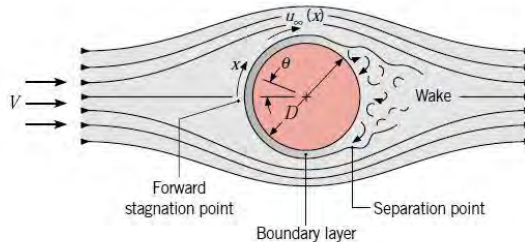
Economizer berfungsi untuk meningkatkan temperatur air sebelum masuk *boiler*. Komponen ini berada didalam *boiler* yang terdiri dari rangkaian *tube* (pipa) yang menerima air dari *inlet*. Sumber panas yang diperlukan oleh *economizer* berasal dari gas buang *boiler*. *Economizer* dapat mengurangi biaya operasi atau menghemat penggunaan bahan bakar, mengurangi potensi terjadinya *thermal shock* dan perubahan drastis suhu air pada *feedwater* menuju *steamdrum*. Koefisien pertukaran panas pada sisi gas lebih rendah dibandingkan koefisien pertukaran panas pada sisi air. Untuk mengimbangi hal ini lapisan permukaan pipa memungkinkan luas area pada pertukaran panas ditingkatkan.

Tubebank merupakan salah satu komponen yang ada didalam *heat exchanger*. *Tube* berfungsi sebagai pemisah antar fluida dan juga sebagai bidang perpindahan panas. Berdasarkan bentuknya *tube* dibedakan menjadi dua yaitu silinder sirkular dan silinder ellips. Silinder sirkular merupakan salah satu contoh dari *bluff body* dua dimensi. Geometri dari silinder sirkular relatif sederhana namun aliran yang melintas akan menjadi kompleks dan senantiasa berubah seiring berubahnya bilangan *Reynolds*.

2.2 Aliran Eksternal Fluida

2.2.1 Aliran fluida pada silinder tunggal

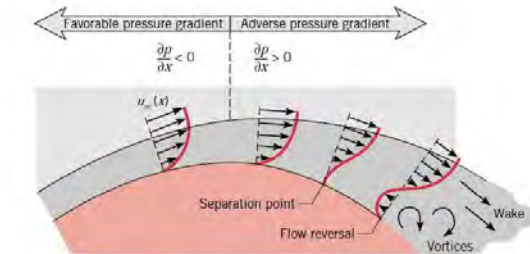
Secara umum aliran eksternal melalui silinder tunggal dengan arah aliran tegak lurus terhadap sumbu silinder. Sesuai dengan gambar 2.1.



Gambar 2.1 *Boundary layer* dan separasi pada silinder sirkular di *cross flow* (Incropera,2002)

Aliran yang melintasi silinder akan terhenti pada *forward stagnation point*, yang kemudian diiringi dengan meningkatnya tekanan. Oleh sebab itu, tekanan akan turun dengan meningkatnya nilai x , *streamline coordinate*, dan *boundary layer* yang dipengaruhi oleh *favorable pressure gradient* ($dp/dx < 0$). Berdasarkan persamaan *euler* untuk aliran *inviscid*, kecepatan aliran fluida, $u_\infty(x)$, berbanding terbalik dengan tekanan pada kontur permukaan silinder, $p(x)$. Dimulai dari titik *stagnasi* dengan tekanan yang besar $u_\infty = 0$, fluida akan mengalami akselerasi karena *favorable pressure gradient* ($du_\infty/dx > 0$ ketika $dp/dx < 0$), mencapai kecepatan maksimum pada $dp/dx = 0$. Dan mengalami perlambatan karena adanya *adverse pressure gradient* ($du_\infty/dx < 0$ ketika $dp/dx > 0$). Ketika fluida mengalami perlambatan, gradien kecepatan pada permukaan, $\partial u / \partial y|_{y=0}$ menjadi nol, seperti ditunjukkan pada gambar 2.2. Pada bagian tersebut merupakan titik separasi. Fluida didekat permukaan kekurangan momentum untuk melawan gradien

tekanan sehingga fluida tidak akan dapat bergerak maju dan *wake* akan terjadi pada daerah *downstream*.

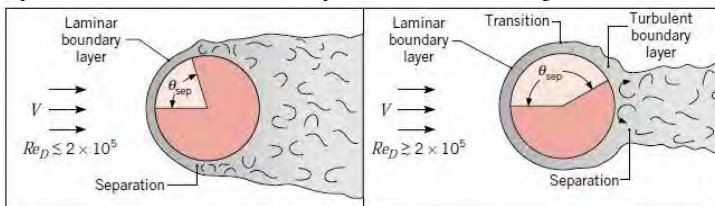


Gambar 2.2 Profil kecepatan pada dinding silinder
(Incropera,2002)

Terbentuknya transisi lapisan batas tergantung pada bilangan *Reynolds* serta posisi dari titik separasi. Untuk silinder sirkular panjang karakteristik diameter dan bilangan *Reynolds* didefinisikan seperti persamaan 1.

$$Re_D \equiv \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu} \dots\dots\dots(1)$$

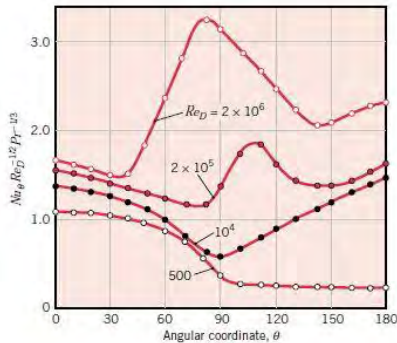
Karena momentum aliran pada lapisan batas turbulen lebih besar dibandingkan dengan lapisan batas laminar. Oleh sebab itu dapat menunda terjadinya separasi. Jika $Re_D \leq 2 \times 10^5$, lapisan batasnya laminar dengan sudut separasi $\theta \approx 80^\circ$ (gambar 2.3). Akan tetapi ketika $Re_D \geq 2 \times 10^5$ akan terbentuk lapisan batas transisi dan separasi ditunda menjadi $\theta \approx 140^\circ$.



Gambar 2.3 Pengaruh turbulensi terhadap separasi
(Incropera,2002)

2.3 Konveksi *Heat and Mass Transfer*

Hasil dari sebuah eksperimen mengenai variasi nilai *Nusselt Number* dengan nilai θ ditunjukkan dengan gambar 2.4 untuk silinder dengan udara *cross flow*. Tidak seperti yang diharapkan, hasilnya dipengaruhi oleh karakter dari lapisan batas yang ada pada permukaan. Kondisi yang diasumsikan $Re_D \leq 10^5$. Mulai dari *stagnation point*, nilai Nu_θ menurun dengan meningkatnya θ sebagai hasil dari lapisan batas laminar. Meskipun begitu, nilai minimum tercapai pada $\theta \approx 80^\circ$, dimana terjadi separasi dan nilai Nu_θ meningkat akibat adanya turbulensi fluida yang disebabkan oleh terbentuknya *vortex* pada daerah *wake*.



Gambar 2.4 *Nusselt Number Local* untuk aliran udara secara normal pada silinder sirkular (Incropera,2002)

Dengan adanya perkembangan lebih lanjut pada lapisan batas turbulensi, nilai Nu_θ dapat menurun kembali. Berdasarkan sudut pandang *engineering*, kondisi rata-rata secara keseluruhan lebih diperhatikan. Korelasi empiris menurut Hilpert yang telah dimodifikasi untuk menjelaskan variasi *Prandtl numbers*.

$$\overline{Nu_D} = \frac{\bar{h}D}{k} = C Re_D^m Pr^{1/3} \dots\dots\dots(2)$$

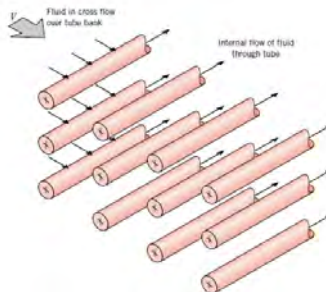
Dengan $Pr \geq 0.7$, nilai C dan m ditentukan berdasarkan *Reynold number* tercantum pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Konstanta untuk persamaan silinder pada *cross flow*

Re_D	C	m
0.4 - 4	0.989	0.330
4 - 40	0.911	0.385
40 - 4000	0.683	0.466
4000 - 40.000	0.193	0.618
40.000 - 400.000	0.027	0.805

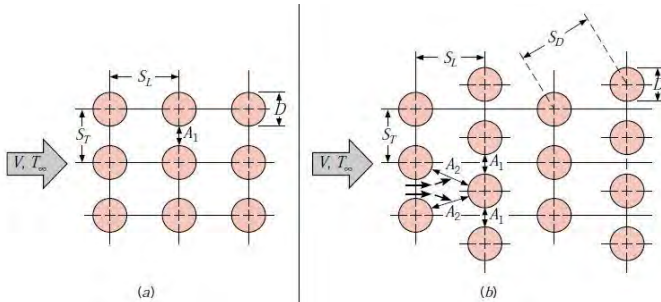
2.4 Aliran Fluida Melintasi *Tube Banks*

Perpindahan panas yang masuk maupun keluar dari *tube bank* pada *cross flow* banyak ditemui dalam aplikasi industri, seperti pada *boiler* atau pendingin ruangan. Susunan geometri ditunjukkan pada gambar 2.5. Secara khusus, suatu fluida keluar dari *tube* dan fluida lain dengan temperatur yang berbeda melewati *tube*.



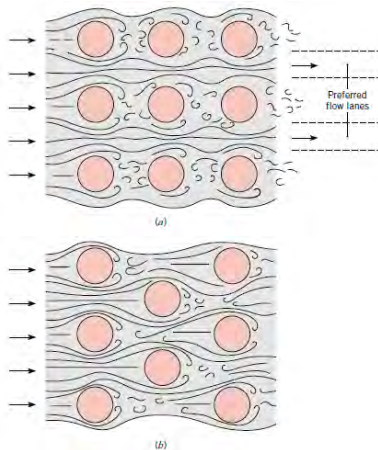
Gambar 2.5 Skema *tubebank* dengan aliran yang melintasi *tube* (Incropera,2002)

Ada 2 tipe susunan *tube* yaitu *Aligned* dan *Staggered* dengan arah aliran kecepatan (V) seperti pada gambar 2.6. Konfigurasi yang ada dengan ditandai oleh diameter *tube* D , *transverse pitch* (S_T) dan *longitudinal pitch* (S_L) yang diukur diantara bagian tengah *tube*. Kondisi aliran didalam bank didominasi dari efek separasi lapisan batas dan interaksi pada bagian *wake*, yang memberi pengaruh pada konveksi *heat transfer*.



Gambar 2.6 Susunan tubebanks (a) Aligned (b) Staggered (Incropera,2002)

Aliran yang melintasi *tube* pada baris pertama pada *tube bank* serupa dengan aliran yang melintasi *tube* tunggal secara tegak lurus. Untuk baris *tube* berikutnya, aliran sangat dipengaruhi oleh susunan *tube*. Tingkat turbulensi aliran yang melintasi *tube* dan jumlah baris memberikan pengaruh pada koefisien konveksi. Pada umumnya nilai koefisien konveksi akan bertambah dengan bertambahnya jumlah baris sampai baris kelima, setelah itu hanya akan ada sedikit perubahan pada nilai koefisien konveksi. Untuk nilai S_L yang besar berpengaruh pada baris *upstream* akan menurun, dan perpindahan panas didalam baris *downstream* tidak bertambah. Oleh karena itu, pada susunan *tube aligned* perbandingan antara S_T dan S_L kurang 0.7 tidak disarankan. sedangkan pada susunan *tube staggered*, arah aliran yang terjadi berkelok, dan bercampur dengan *crossflow* sehingga akan relative meningkat dibandingkan dengan susunan *aligned tube*. Secara umum, peningkatan perpindahan panas yang baik melalui banyak kelok aliran seperti pada susunan *staggered tube*. fenomena ini berlaku untuk *Reynold Number* kecil yaitu kurang dari 100. Kondisi aliran bergantung pada susunan *tube bank* seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.7.

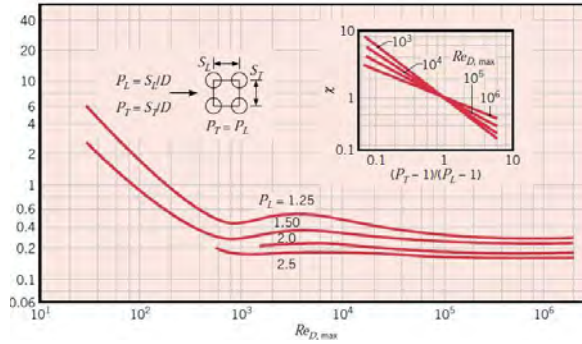


Gambar 2.7 Kondisi aliran pada susunan (a) *Aligned* dan (b) *staggered* (Incropera, 2002)

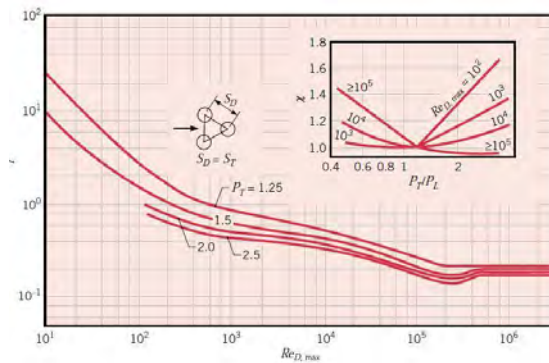
Pada aliran yang melintasi *tube banks* tidak hanya laju perpindahan panas, *pressure drop* juga merupakan hal penting yang harus diperhatikan. Daya yang diperlukan untuk perpindahan fluida melintasi *tube bank* merupakan beban operasi utama dan sebanding dengan besarnya *pressure drop*. Besar nilai *pressure drop* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\Delta p = N_L \chi \left(\frac{\rho V_{max}^2}{2} \right) f \dots \dots \dots (3)$$

Faktor gesekan (f) dan faktor koreksi (χ) ditunjukkan oleh gambar 2.8 dan gambar 2.9. Pada gambar 2.8 merupakan susunan pipa *aligned* dan gambar 10 merupakan susunan pipa *staggered*. Jarak *longitudinal* dan *transversal* yaitu S_L / D dan $P_T = S_T / D$. sedangkan pada gambar 2.9 dapat diaplikasikan untuk susunan pipa *staggered* dengan $S_T = S_D$.



Gambar 2.8 Faktor gesekan dan faktor koreksi pada susunan pipa *aligned* (Incropera, 2002)

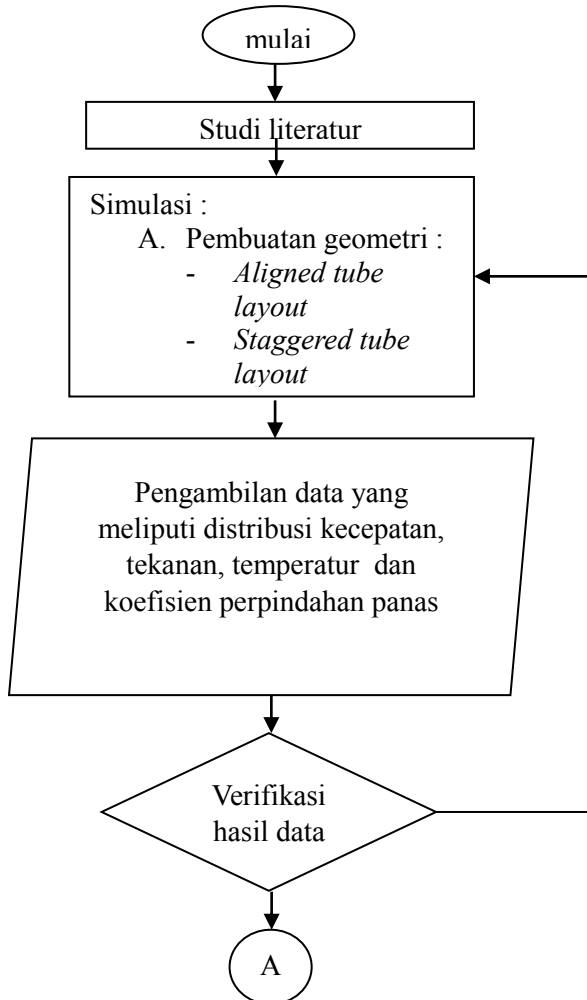


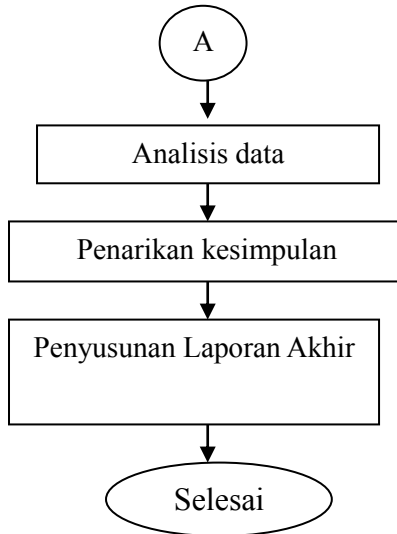
Gambar 2.9 Faktor gesekan dan faktor koreksi pada susunan pipa *staggered* (Incropera, 2002)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Skema Diagram Alir Penelitian

Secara umum tahap-tahap pengerjaan tugas akhir ini dirangkum pada diagram alir berikut ini.





Gambar 3.1 Skema diagram alir penelitian

3.2 Pengumpulan Data Masukan Parameter Desain

Data yang diperlukan untuk parameter masukan meliputi temperatur *economizer* dan laju aliran yang ada didalam *economizer*.

Tabel 3.1 Data parameter masukan desain *economizer*

Parameter masukan	Nilai
Temperatur Gas Buang (K)	644
Kecepatan Gas Buang (m/s)	7.5
Viskositas Absolute Gas buang (N.s/m ²)	2.048×10^{-5}
Konduktivitas thermal gas buang (W/m.K)	0.0294
Panas spesifik gas buang (J/kg.K)	1051
Densitas Gas Buang (kg/m ³)	1.018

3.3 Perhitungan jarak *transverse pitch* (S_T) dan *longitudinal pitch* (S_L)

Terdapat 2 tipe susunan pipa yaitu *aligned* dan *staggered*. Konfigurasi yang ada ditandai oleh diameter pipa D_o , *transverse pitch* (S_T) dan *longitudinal pitch* (S_L) yang diukur antara tengah diameter pipa. Susunan tube bank dapat dilihat pada gambar

2.6. Aliran yang melewati pipa-pipa di dominasi oleh efek separasi *boundary layer* dan interaksi antar *wake*, hal ini berkaitan dengan perpindahan panas yang terjadi secara konveksi. Koefisien konveksi pada baris meningkat dengan bertambahnya jumlah baris pipa hingga pada baris pipa ke lima. Setelah baris pipa kelima peningkatan koefisien konveksi menjadi kecil. Untuk nilai S_L yang besar, pengaruh dari *upstream* pada baris pipa menurun, dan perpindahan panas pada *downstream* tidak maksimal. Oleh karena itu, pada *tube bank* dengan susunan *aligned* nilai $S_T/S_L < 0.7$ tidak disarankan. Untuk susunan *staggered*, aliran yang melewati pipa sangat rumit, dan terjadi pencampuran dengan aliran dari sisi lain. Sehingga aliran pada *staggered* relatif lebih besar jika dibandingkan dengan *aligned*. Selain itu Jarak antar pipa dapat mempengaruhi distribusi kecepatan dan temperatur pada *heat exchanger*.

3.4 Simulasi Desain *Economizer*

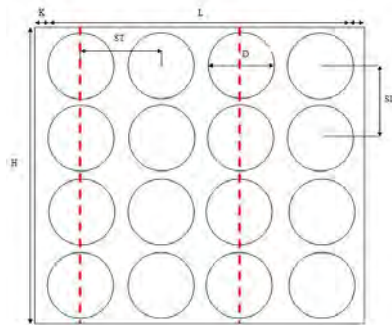
Pada penelitian ini akan menampilkan hasil simulasi numerik pada *economizer tube banks*. Simulasi numerik merupakan sebuah proses simulasi berbasis perhitungan yang dilakukan oleh perangkat lunak komputer dengan mendefinisikan parameter-parameter yang sesuai dengan *boundary condition*, kemudian dilanjutkan dengan proses iterasi atau pengulangan sampai tercapainya konvergensi untuk mendapatkan nilai pendekatan terbaik. Pada proses numerik terbagi menjadi 3 tahapan, yaitu *pre-processing*, *processing* dan *postprocessing*.

3.4.1 *Pre Processing*

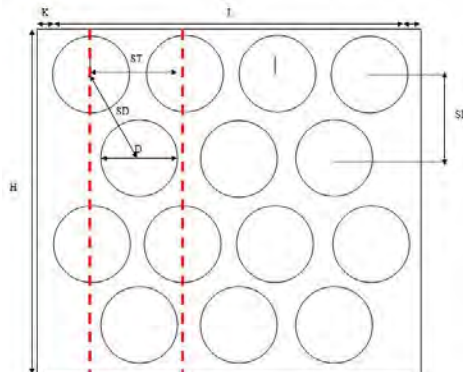
Pre-Processing merupakan proses awal dalam melakukan simulasi dengan metode *Computational Fluid Dynamic* (CFD). Pada proses ini dilakukan pembuatan geometri dan menentukan domain dari *control volume* yang akan disimulasikan. Terdapat beberapa tahapan dari proses *Pre-Processing* antara lain:

a. Pembuatan Geometri

Model geometri yang dibuat merupakan *tube banks* dengan susunan *tube aligned* dan *staggered*. Kemudian akan ditentukan suatu *control volume* yang dapat mewakili sistem secara menyeluruh seperti pada gambar 3.2, dan rincian dimensi pada tabel 3.1. pemodelan dilakukan dengan menggunakan 16 buah tubes tersusun aligned dan 14 buah tubes tersusun staggered.

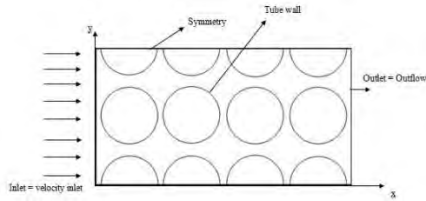


(a)

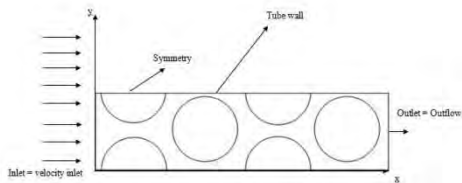


(b)

Gambar 3.2 Geometri untuk susunan *tube aligned* (a) dan *staggered* (b)



(a)



(b)

Gambar 3.3 Domain susunan pipa *aligned* (a) dan *staggered* (b)

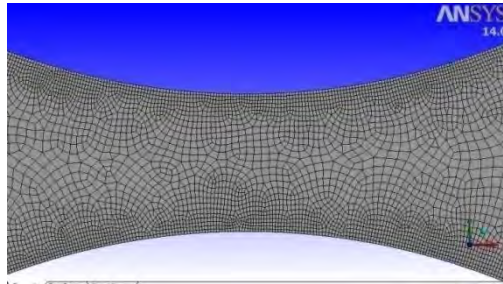
Tabel 3.2 Geometri *cylinder tube banks* susunan *aligned* dan *staggered*

Dimensi	Value	
	Aligned	Staggered
Diameter luar (mm)	50.8	
Diameter dalam (mm)	47.6	
Jarak transversal (ST)	60	
	65	
	80	
Jarak longitudinal (SL)	55	
	60	
Jumlah baris Tube	16	14

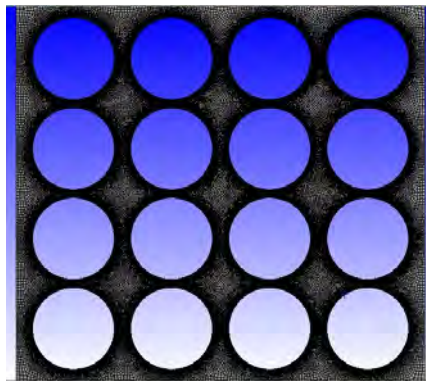
b. Meshing

Proses *meshing* dilakukan berdasarkan geometri *control volume*. *Mesh* yang digunakan adalah jenis *Quadrilateral Dominant*. Karakteristik aliran yang akan

dianalisis adalah aliran pada bagian *control volume* yang melewati *tube-tube*. *Meshing* untuk pemodelan 2D *aligned* dan *staggered tube banks* ditunjukkan pada **Gambar 3.4** dan **Gambar 3.5** berikut:



Gambar 3.4 Hasil *Meshing*



Gambar 3.5 *Meshing* secara keseluruhan

Pada proses *meshing* ada beberapa pengaturan yang diubah sesuai dengan kondisi geometri. Diantara nya adalah nilai *relevance* diubah menjadi 100 serta *edge sizing* pada setiap sisi *tube* diubah menjadi 0.1 mm. Hal ini dilakukan agar hasil yang didapatkan dari simulasi mendekati teori yang ada.

Tabel 3.3 Hasil Simulasi *Meshing*

Model	Variasi (SL/ST)	Nodes	Elements
A	5560 Aligned	308998	297723
B	5560 Staggered	265403	255280
C	5580 Aligned	305995	294568
D	5580 Staggered	275841	265710
E	6065 Aligned	266749	254904
F	6065 Staggered	258571	248650
G	6080 Aligned	248333	236257
H	6080 Staggered	287539	277529

3.4.2 Menentukan *Boundary Condition*

Tahapan selanjutnya adalah menentukan *boundary condition* atau kondisi batas pada objek yang akan disimulasikan. Pada tabel 3.3 dapat dilihat parameter-parameter yang digunakan pada *boundary condition*.

Tabel 3.4 Parameter *boundary condition*

<i>Boundary condition</i>	keterangan
<i>Inlet</i>	Tipe : <i>Velocity inlet</i> Kecepatan : 7.5 m/s Temperatur : 644 K
<i>Outlet</i>	Tipe : <i>Outflow</i>
<i>Tube wall</i>	Tipe : <i>Stationary Wall</i> Temperatur : 478 K
Garis bantu atas dan bawah	Tipe : <i>Symmetry</i>

3.4.3 *Processing*

Tahapan kedua setelah *Pre-Processing* ialah *Processing*. Pada tahap *processing* mengatur *solver model*, *viscous*

model, materials, boundary condition, control and monitoring conditions, serta *initialize conditions*. Kemudian dilakukan proses iterasi untuk menyelesaikan proses simulasi. Berikut ini adalah penjelasan mengenai langkah-langkah dalam *processing* :

3.4.3.1 Solver model

Persamaan energi yang ada pada *solver model* diaktifkan untuk mendukung penyelesaian *heat transfer* dan *kompabilitas* aliran terhadap perubahan temperatur dan tekanan. Untuk *turbulence modeling* yang digunakan ialah RSM (*Reynolds stress model*). Pemilihan *Reynold stress model* karena model ini mendukung turbulensi yang ada pada sisi luar pipa.

3.4.3.2 Material

Dalam simulasi ini material yang digunakan ada 2 macam yaitu fluida kerja yang mengalir dan material dari *tube*. Fluida kerja yang mengalir dimodelkan sebagai gas ideal dengan temperatur 644 K dan material *tube* berupa *aluminium*. Properties fluida diperoleh dari tabel A4 pada buku “*Fundanetals Heat and Mass Transfer Sixth Edition*” karya Incropera, dkk. (2002). Berikut adalah tabel properties fluida yang mengalir :

Tabel 3.5 Properties fluida (Gas Ideal)

Properties	Value
Temperatur <i>Inlet</i> (K)	644
<i>Density</i> (Kg/m ³)	0.541
<i>Specific heat</i> (Cp) (KJ/Kg.K)	1062
<i>Thermal Conductivity</i> (W/m.K)	0.04936
<i>Absolut Viscosity</i> (μ) (Kg/m.s)	3.205 x 10 ⁻⁵

3.4.3.3 *Boundary Condition*

Pada *boundary condition* terdapat beberapa variabel yang dimasukkan sebagai parameter simulasi. Variabel yang digunakan tertera pada tabel 3.3.

3.4.3.4 *Control and Monitoring Solution*

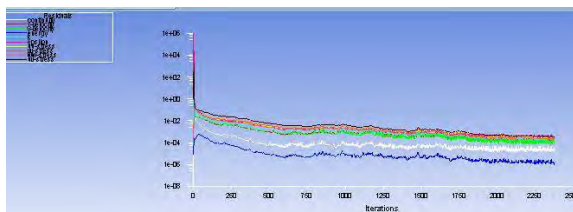
Solution control yang digunakan pada metode *pressure-velocity coupling* adalah SIMPLE dengan diskritisasi *second order upwind* untuk seluruh parameter. Pada bagian *monitoring solution* dilakukan pengaturan kriteria residual untuk seluruh parameter sebesar 10^{-3} kecuali energi sebesar 10^{-6} . Namun pada variasi 5580 *Aligned* kriteria residual energi sebesar 10^{-5} .

3.4.3.5 *Initialize Condition*

Initialize adalah nilai awal untuk setiap parameter sebelum dilakukan proses iterasi pada simulasi. Metode inisialisasi yang digunakan adalah *standart initialize* untuk mendapatkan nilai parameter awal berdasarkan *boundary conditions* pada sisi *inlet*.

3.4.3.6 *Iterations*

Iterations merupakan tahap terakhir setelah seluruh pengaturan dilakukan. Proses simulasi dimulai dengan melakukan iterasi sejumlah 1000 iterasi hingga mencapai kriteria konvergensi, kriteria konvergensi telah diatur pada pengaturan *residual monitoring level*. Berikut merupakan grafik iterasi hingga mencapai kriteria konvergen :



Gambar 3.6 Iterations

3.4.4 *Post-Processing*

Pada tahap *post-processing* didapatkan hasil dari simulasi berupa nilai Temperatur *outlet*, kecepatan maksimal, perpindahan panas pada *surface* serta *nusselt number*. Selain nilai, didapatkan juga visualisasi persebaran panas dan kecepatan yang melewati susunan *tube*. Dari nilai yang didapatkan akan diolah menjadi sebuah grafik.

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

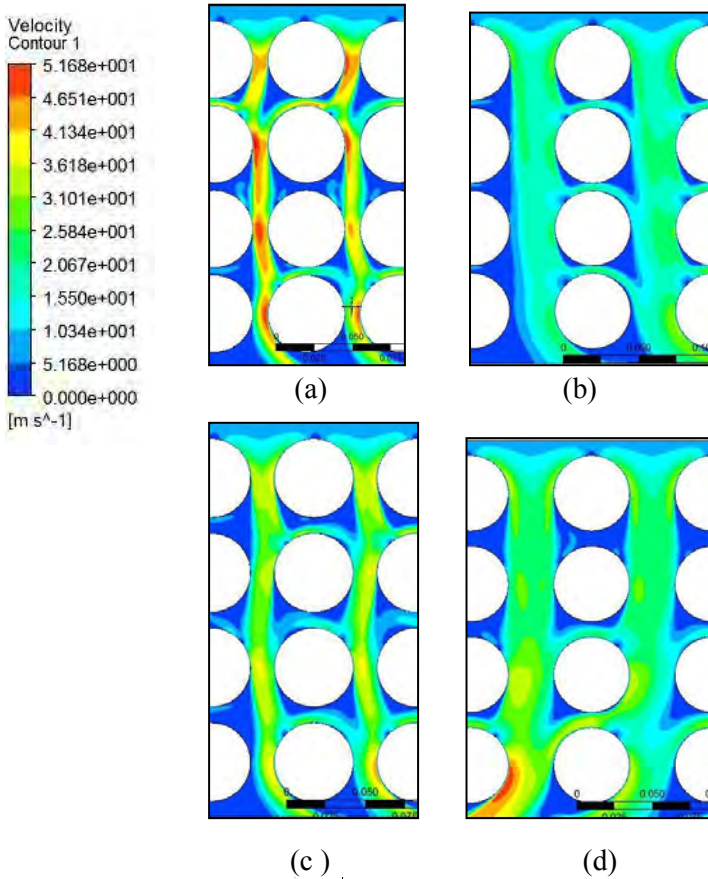
Pada bab ini akan membahas hasil simulasi mengenai pengaruh susunan *tubealigned* dan *staggered* dengan empat variasi jarak S_T dan S_L terhadap karakteristik perpindahan panas secara konveksi. Data yang akan diolah meliputi kontur kecepatan dan kontur suhu. Penelitian ini difokuskan untuk meneliti fenomena perpindahan panas dan karakteristik aliran pada sisi luar *tube economizer* serta rata-rata perubahan nilai yang terjadi pada keseluruhan sistem *economizer*.

4.1 Analisis Pengaruh Susunan *TubeAligned* Dan *Staggered* Terhadap Kecepatan Aliran

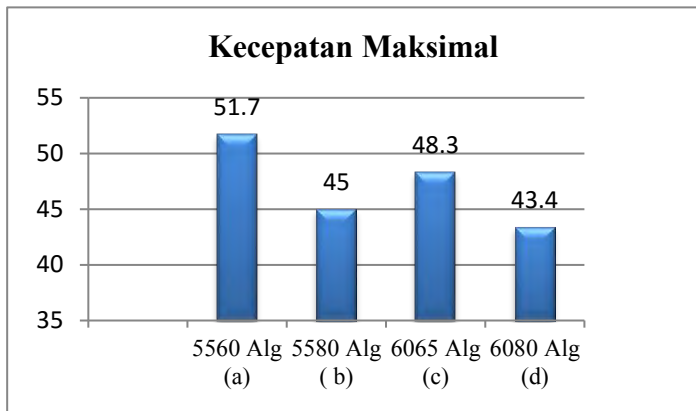
Pada sub bab ini akan membahas mengenai pengaruh susunan *tubealigned* dan *staggered* pada *economizer*. Analisis data dilakukan secara kualitatif dan kuantitatif. Secara kualitatif data yang didapatkan meliputi visualisasi kontur kecepatan yang melewati *tube* dengan variasi susunan *tube* serta jarak S_T dan S_L yang digunakan.

4.1.1 Analisis Kecepatan Lokal Pada Susunan *TubeAligned* Secara Keseluruhan

Fenomena aliran pada *tube banks* dengan susunan *tubealigned* secara detail ditunjukkan pada tampilan kontur kecepatan. Kontur kecepatan pada *tube banks* dengan variasi jarak S_T dan S_L dengan kecepatan *inlet* 7.5 m/s. Arah *inlet* pada simulasi berada pada sisi atas. Hasil simulasi ditunjukkan pada gambar berikut :

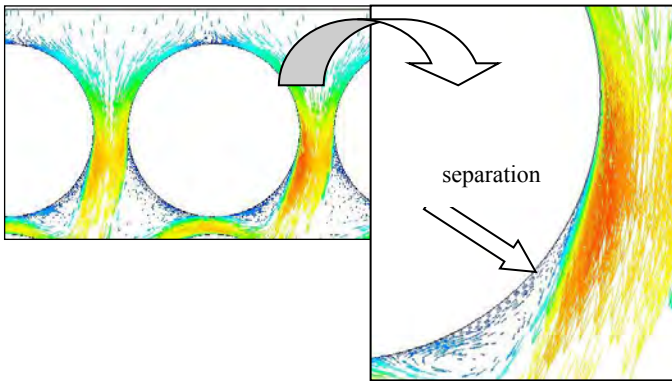


Gambar 4.1 Distribusi kecepatan pada susunan *aligned* dengan jarak S_L/S_T (a) 5560 (b) 5580 (c) 6065 (d) 6080



Gambar 4.2 Grafik Kecepatan Maksimal pada susunan *tubeAligned*

Dari gambar 4.1 dapat terlihat distribusi kecepatan lokal pada model yang ditunjukkan oleh kontur aliran dengan warna merah. Dimana warna merah menunjukkan kecepatan dengan nilai tinggi, sedangkan kontur dengan warna biru tua memiliki nilai kecepatan yang paling rendah. Dari empat variasi jarak S_L/S_T dapat diketahui bahwa variasi jarak 55/60 memiliki kontur warna merah yang melewati *tube* lebih dominan dibandingkan dengan variasi lainnya. *Range* yang digunakan untuk melihat kecepatan maksimal pada seluruh variasi mulai dari 0 m/s hingga 51.7 m/s. Data kuantitatif juga menunjukkan bahwa variasi 55/60 memiliki distribusi kecepatan optimum yaitu sebesar 51.7 m/s. Fenomena ini sesuai dengan hukum Bernoulli, dimana kecepatan fluida mengalir akan meningkat jika luasan dari bidang yang dilewati fluida kecil. Begitupun sebaliknya, jika luasan bidang yang dilewati fluida besar maka kecepatan dari fluida yang mengalir juga menurun. Kontur warna merah pada gambar menunjukkan tingginya kecepatan dan turbulensi pada aliran. Pada model (a) kontur warna merah berada pada sisi luar *tube* di celah transversal. Hal ini karena adanya percampuran dengan kecepatan dari arah lain yang menumbuk *tube* lainnya. Gambar 4.3 menunjukkan arah aliran yang terjadi pada variasi 55/60.



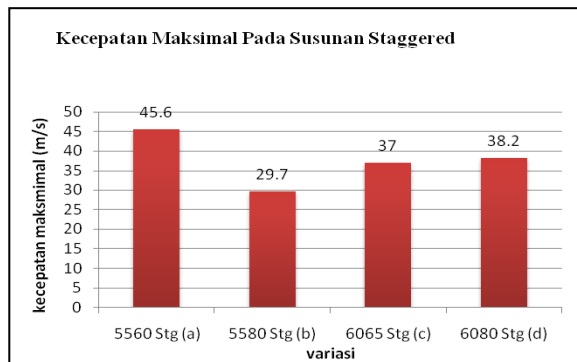
Gambar 4.3 Visualisasi vektor kecepatan pada susunan *aligned*
55/60

Kecepatan yang mengenai titik ujung *tube* memiliki warna biru tua yang menandakan kecepatan pada titik tersebut hampir bernilai 0 m/s. Karena pada titik tersebut merupakan titik *stagnation*. Titik dimana suatu fluida mengalami tekanan lokal terbesar, namun memiliki kecepatan minimum. Setelah mencapai titik *stagnation*, aliran fluida terpecah menjadi dua bagian yaitu pada sisi kanan dan kiri *tube*. Ketika tekanan lokal memiliki nilai kurang dari nol, aliran tersebut melewati daerah *favorable pressure gradient*. Maka kecepatan aliran pada daerah itu memiliki nilai kecepatan tinggi, hal ini ditunjukkan pada gambar dengan vektor berwarna *orange*. Terjadi perubahan warna menjadi kuning, hijau dan biru yang menandakan nilai kecepatan menurun. Hal ini terjadi karena aliran melewati daerah *adverse pressure gradient*. Pada *adverse pressure gradient*, tekanan lokal bernilai lebih dari nol. sehingga nilai kecepatan menurun. Kecepatan lokal akan kembali mendekati nilai nol karena aliran mengalami separasi. Separasi aliran terjadi ketika suatu aliran tidak mampu melawan *adverse pressure gradient* dan *friction effect* pada kontur *tube*, akibatnya akan terjadi pengurangan momentum aliran dan aliran seakan-akan terlepas dari kontur.

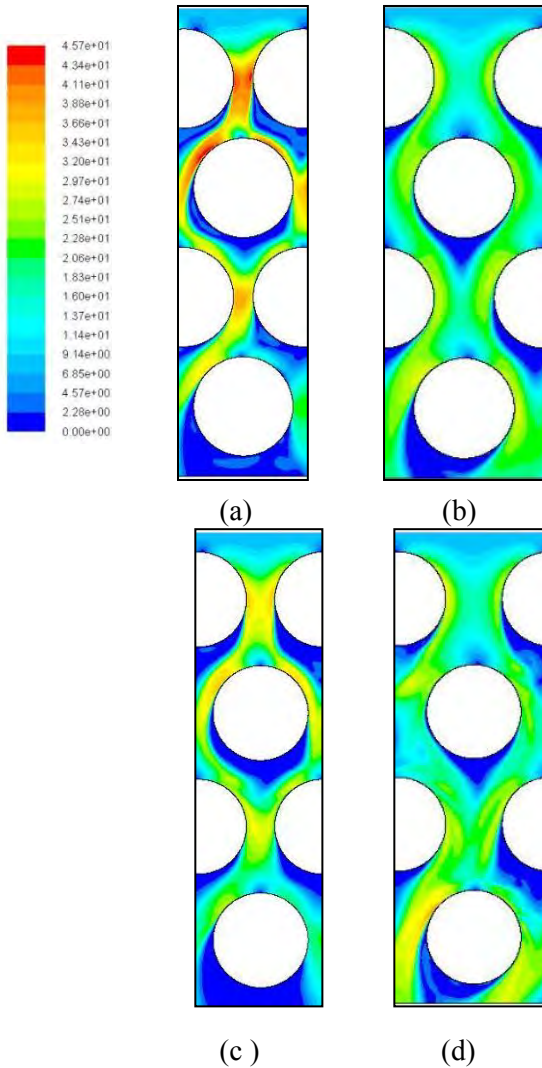
Pada bagian ujung belakang *tube* merupakan titik *stagnasi* bagian bawah, dimana terjadi separasi lapisan batas yang ditandai dengan aliran membalik. Terjadinya Separasi lapisan batas bergantung dari nilai *Reynolds Number* dan juga titik terjadinya separasi. Titik separasi yang terjadi juga dipengaruhi oleh variasi *transversal pitch* (S_T) dan *longitudinal pitch* (S_L). Semakin kecil S_T maka semakin tinggi nilai kecepatan localnya. Sedangkan semakin kecil nilai S_L maka titik separasi yang terjadi akan semakin jauh kebelakang.

4.1.2 Analisis Kecepatan Lokal Pada Susunan *Tube Staggered* Secara Keseluruhan

Fenomena aliran fluida pada *tube banks* dengan susunan *tube staggered* secara detail ditunjukkan dengan kontur warna dari hasil simulasi. Data yang diambil yaitu data secara kualitatif dan data kuantitatif. Data kualitatif meliputi kontur warna dari distribusi kecepatan serta karakteristik aliran. Berikut grafik dari data kuantitatif :

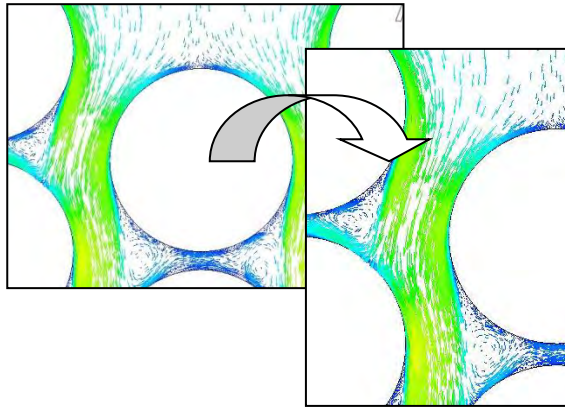


Gambar 4.5 Grafik kecepatan maksimal pada susunan *tube Staggered*



Gambar 4.4 Distribusi kecepatan pada susunan *staggered* dengan jarak S_L/S_T (a) 5560 (b) 5580 (c) 6065 (d) 6080

Dari gambar 4.4 dapat kita lihat kontur warna ada pada seluruh variasi jarak S_L/S_T . Jika dilihat dari kontur warna yang ada, variasi jarak 55/60 memiliki kontur warna kuning di beberapa bagian celah transversal. Secara kuantitatif kecepatan pada variasi jarak 55/60 memiliki kecepatan maksimal sebesar 45.6 m/s. Nilai ini lebih besar jika dibandingkan dengan variasi jarak yang lain. Berbeda dengan *aligned*, kecepatan pada *staggered* lebih rendah meskipun memiliki variasi jarak S_L/S_T yang sama. Hal ini karena susunan *staggered* berbentuk pola segitiga yang menghalangi aliran dari inlet. Sehingga kecepatan aliran menurun. Selain itu, karakteristik aliran juga berbeda dengan susunan *tube* secara *aligned*. Gambar 4.5 menunjukkan hasil data kuantitatif bahwa nilai kecepatan pada variasi 55/60 memiliki nilai terbesar. Dapat dilihat dengan visualisasi kecepatan secara vektor pada baris pertama *tube* bagian kolom kedua seperti pada gambar dibawah ini :



Gambar 4.6 Visualisasi kecepatan vektor pada susunan *staggered* dengan variasi jarak 55/60.

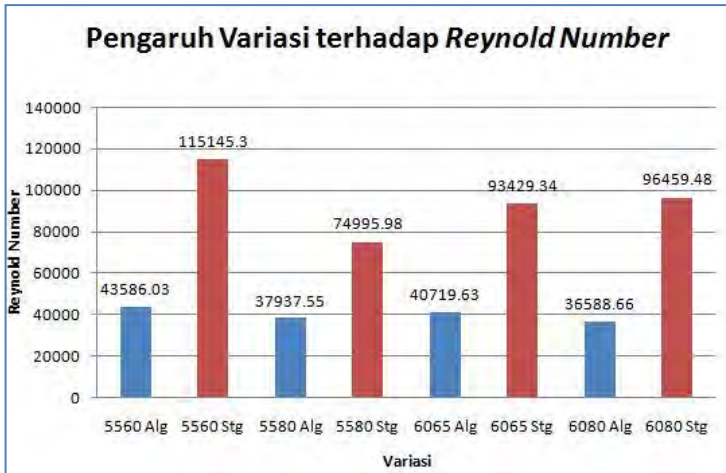
Dari gambar 4.6 diketahui bahwa aliran yang berada di ujung *tube* memiliki warna biru tua, menandakan kecepatan pada bagian tersebut mendekati 0 m/s. Bagian tersebut merupakan titik *stagnasi* aliran. Setelah terjadi *stagnasi*, aliran akan terbagi

menjadi dua yaitu pada sisi kanan dan kiri *tube*. Pada bagian sisi luar *tube* yang memiliki nilai tekanan lokal kurang dari nol maka akan memiliki nilai kecepatan tinggi. Bagian tersebut merupakan *favorable pressure gradient*. Jika ditinjau dari gambar 4.4 bagian *favorable pressure gradient* berada pada vektor dengan warna biru muda hingga hijau dan kuning. Kemudian aliran akan berada pada bagian *adverse pressure gradient*. Pada bagian tersebut tekanan lokal memiliki nilai lebih dari nol sehingga nilai kecepatan menurun. Hal ini dibuktikan dengan berubahnya warna vektor yang kembali menjadi warna biru muda. Setelah itu aliran akan berada pada titik separasi yaitu titik aliran seakan-akan tidak dapat mengikuti kontur aliran yang ada hingga terjadi aliran balik. Diujung bawah *tube* warna vektor berubah menjadi biru tua yang menandakan kecepatan bernilai 0 m/s. Hal tersebut menandakan titik *stagnasi* ujung bawah *tube*.

4.2 Pengaruh Susunan *Tube* Serta Variasi Jarak S_L/S_T Terhadap *Reynolds Number*

Setelah dilakukan simulasi diketahui bahwa setiap variasi susunan *tube aligned* dan *staggered* dengan variasi jarak S_L/S_T akan mempengaruhi kecepatan maksimum yang dihasilkan oleh aliran fluida saat melewati *tube banks*. Perbedaan dari distribusi kecepatan yang dihasilkan akan mempengaruhi nilai *Reynolds Number* dari aliran tersebut. Dapat dilihat pada gambar 4.1.

Reynolds Number merupakan parameter yang menggambarkan karakteristik dari suatu aliran. Semakin besar nilai *Reynolds Number* maka turbulensi aliran fluida yang melewati *tube* semakin besar. Hal ini akan berpengaruh terhadap koefisien perpindahan panas pada *tube*.



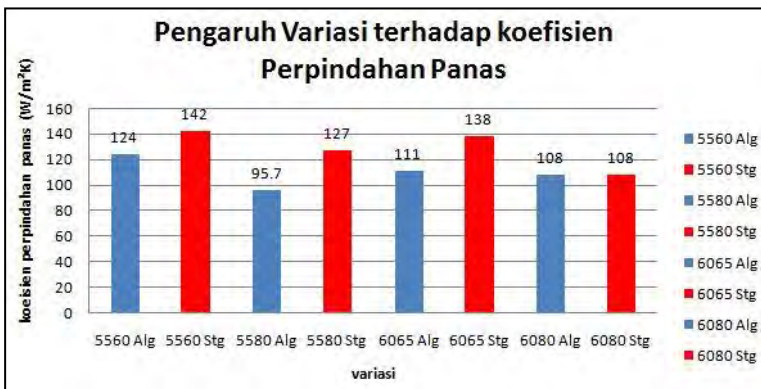
Gambar 4.7 Pengaruh susunan *tube aligned* dan *staggered* serta jarak S_L/S_T terhadap *Reynolds Number*

Pada gambar 4.7 terlihat bahwa *Reynolds Number* terbesar diperoleh pada susunan *staggered* dengan jarak 55/60 sebesar 115145.3. Fenomena ini terjadi karena nilai *Reynolds Number* selain bergantung pada nilai kecepatan maksimal aliran yang melewati susunan *tube* juga dipengaruhi oleh geometri susunan *tube*. Pada susunan *staggered*, nilai *Reynolds Number* lebih besar karena nilai *Reynolds Number* menunjukkan jenis aliran yang terjadi pada daerah tersebut turbulen atau laminar. Didalam susunan *staggered* aliran fluida yang masuk pada *tube banks* terhalangi oleh *tube-tube* sehingga aliran akan mengalami turbulensi yang lebih besar dibandingkan dengan susunan *tube aligned*. Sedangkan pada susunan *tube aligned*, susunan dengan variasi jarak 55/60 memiliki kecepatan maksimum yang paling besar dibandingkan dengan variasi yang lain. Sehingga nilai *Reynolds Number* yang dimiliki oleh susunan aligned variasi jarak 55/60 paling besar. *Reynolds Number* berbanding lurus dengan kecepatan maksimum fluida yang mengalir. Sehingga

ketika kecepatan fluida tersebut besar maka nilai *Reynolds Number* juga besar. Selain itu nilai *Reynolds Number* juga berpengaruh pada terjadinya lapisan titik separasi yang ada pada aliran dinding silinder. Jika *Reynolds Number* lebih kecil dari 2×10^5 maka lapisan batasnya laminar dengan sudut separasi $\theta \approx 80^\circ$, namun jika nilai *Reynolds Number* lebih besar dari 2×10^5 akan terbentuk lapisan batas transisi dan separasi pada $\theta \approx 140^\circ$. Pada hasil simulasi ini nilai *Reynolds Number* lebih besar dari 2×10^5 . Sehingga lapisan transisi dan separasi berada agak jauh dari titik *stagnation* awal.

4.3 Pengaruh Susunan *Tube* Serta Variasi Jarak S_L/S_T Terhadap Koefisien Perpindahan Panas

Dari hasil simulasi diketahui bahwa setiap variasi susunan *tube aligned* dan *staggered* dengan variasi jarak S_L/S_T mempengaruhi koefisien perpindahan panas yang dihasilkan oleh *tube*. Sehingga perpindahan panas dari masing-masing variasi memiliki nilai yang berbeda bergantung dari geometri yang dibuat.



Gambar 4.8 Pengaruh susunan *tube aligned* dan *staggered* serta jarak S_L/S_T terhadap koefisien perpindahan panas

Dari gambar 4.8 dapat diketahui bahwa koefisien perpindahan panas terbesar ada pada susunan *staggered* dengan variasi jarak 55/60 sebesar $142 \text{ W/m}^2\text{K}$. Begitu juga pada susunan *aligned* koefisien perpindahan panas terbesar ada pada variasi jarak 55/60 dengan nilai sebesar $124 \text{ W/m}^2\text{K}$. Dari keseluruhan variasi baik susunan *aligned* ataupun *staggered*, nilai koefisien perpindahan panas terbesar ada pada susunan *staggered*, namun nilai *Reynolds Number* terbesar ada pada susunan *aligned* 55/60. Fenomena ini terjadi karena adanya pengaruh susunan *tube*. Pada *staggered* susunan *tube* lebih rapat dibandingkan pada susunan *aligned*. Pada subbab 4.5 akan dibahas mengenai persebaran suhu yang ada pada kedua variasi susunan *tube*. Karena pada susunan *staggered*, susunan *tube* lebih rapat maka suhu dari inlet akan mengalami perpindahan panas secara konveksi lebih besar dibandingkan dengan susunan *aligned*. Selain itu variasi jarak S_T dan S_L akan mempengaruhi koefisien perpindahan panas. Seperti yang telah dijelaskan pada subbab sebelumnya. Nilai S_T dan S_L akan mempengaruhi titik terjadinya separasi. Koefisien perpindahan panas pada daerah setelah separasi hingga titik stagnasi diujung belakang *tube* menunjukkan nilai yang lebih besar mengacu pada perubahan warna menjadi lebih terang. Hal ini terlihat pada gambar 4.3 dan gambar 4.6. Hal ini disebabkan oleh lapis batas aliran fluida laminar telah berubah menjadi lapis batas turbulen. Pada aliran turbulen, *vortex* yang terbentuk mengakibatkan aliran fluida berolak sehingga terjadi pencampuran fluida menjadi lebih baik. Dengan adanya turbulensi aliran, perbedaan suhu menjadi lebih kecil dan koefisien perpindahan panas meningkat.

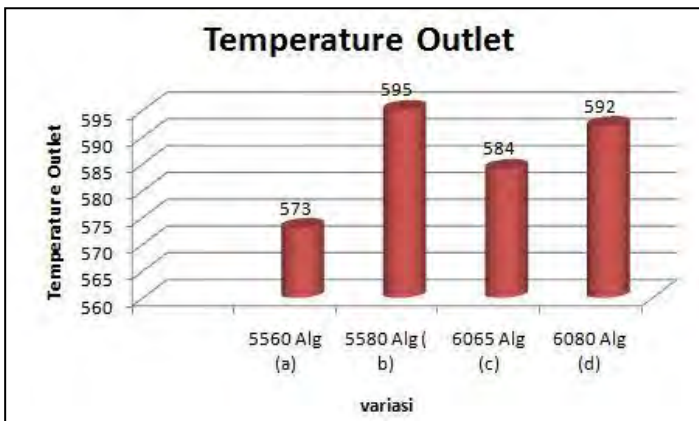
4.4 Analisis Pengaruh Susunan Tube Aligned Dan Staggered Terhadap Distribusi Suhu

Pada sub bab ini akan membahas mengenai pengaruh susunan *tube aligned* dan *staggered* dengan variasi jarak S_L/S_T terhadap distribusi suhu. Analisis data dilakukan secara kualitatif dan kuantitatif. Analisis data secara kualitatif meliputi visualisasi

kontur persebaran suhu yang melewati *tube* dengan variasi susunan *tube* serta jarak S_T dan S_L yang digunakan. Sedangkan untuk analisis data secara kuantitatif meliputi nilai-nilai yang didapatkan dari hasil simulasi.

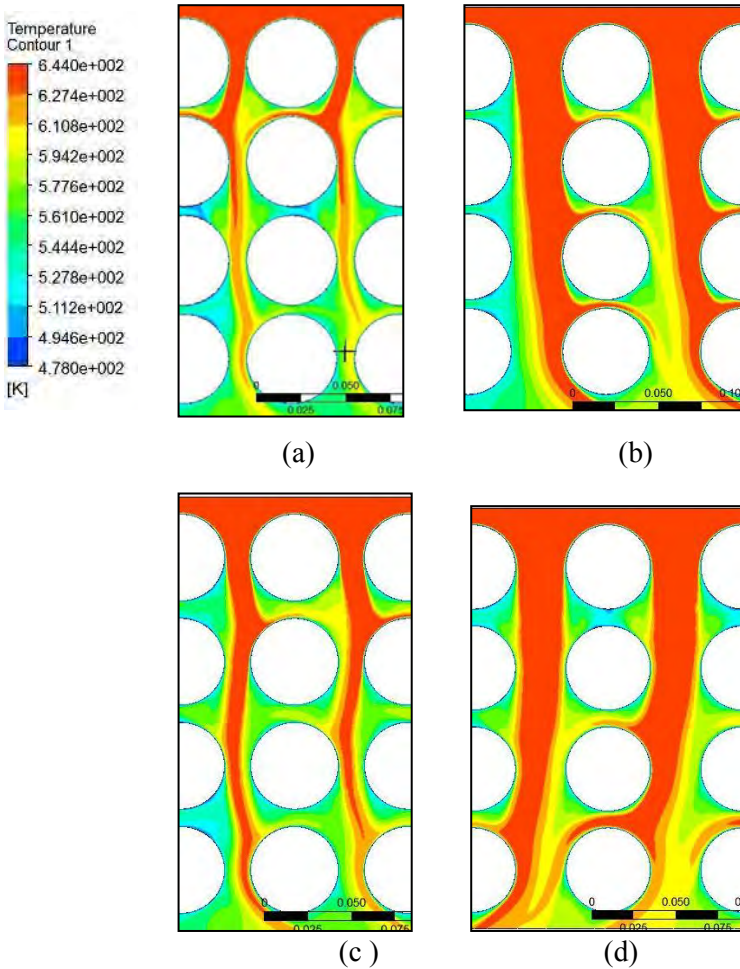
4.4.1 Analisis distribusi suhu lokal pada susunan *tubeAligned* secara keseluruhan

Pada penelitian ini meninjau tentang distribusi suhu yang ada pada susunan *tubealigned* dengan variasi jarak S_L/S_T . Data yang diambil meliputi data kualitatif dan kuantitatif. Dalam data kualitatif dapat dilihat kontur warna dari distribusi suhu serta karakteristik aliran yang ada pada desain. Sedangkan pada data kuantitatif dapat diketahui nilai dari suhu keluaran setiap desain.



Gambar 4.9 Grafik suhuoutlet pada susunan *aligned* dengan jarak S_L/S_T 5560, 5580, 6065, 6080.

Berikut adalah kontur warna dari distribusi suhu pada susunan *tube aligned* dengan variasi jarak S_L/S_T :



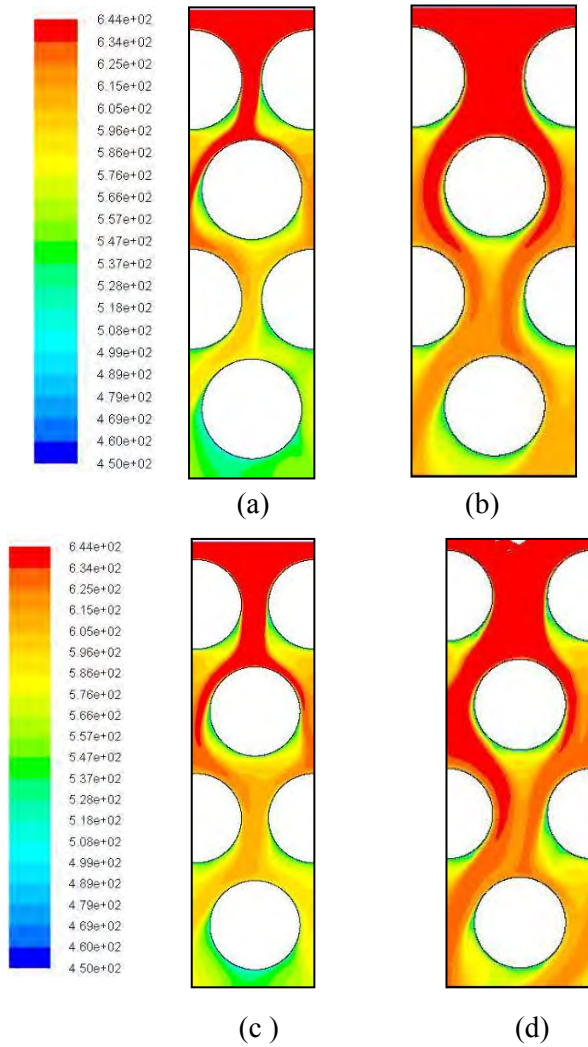
Gambar 4.10 Distribusi suhu pada susunan *aligned* dengan jarak S_L/S_T (a) 5560 (b) 5580 (c) 6065 (d) 6080

Pada gambar 4.10 distribusi suhu ditunjukkan dengan kontur warna merah yang menunjukkan suhu tertinggi sedangkan pada warna biru tua menunjukkan suhu terendah. Pada simulasi ini nilai *inlet* sebesar 644 K dengan kondisi pada inlet seragam. Saat suhu melewati susunan *tube*, maka akan terjadi perpindahan panas antara aliran diluar *tube* dengan dinding *tube*. Suhu aliran yang berada didalam *tube* lebih rendah dibandingkan dengan suhu yang ada diluar *tube*. Sehingga nilai suhu yang keluar dari *tube banks* harus lebih kecil dikarenakan adanya perpindahan panas didalam *tube banks*. Terlihat pada gambar 4.7(a) *inlet* memiliki warna merah secara merata kemudian melewati susunan *tube* dan kontur warna pada sisi outlet berubah menjadi warna hijau dan biru. Pada bagian *tube* baris ketiga terlihat bahwa suhu menurun secara signifikan. Dari data kuantitatif didapatkan nilai suhu yang keluar dari variasi jarak S_L/S_T sebesar 573 K. Dengan demikian perubahan suhu yang terjadi pada variasi jarak 55/60 sebesar 71 K.

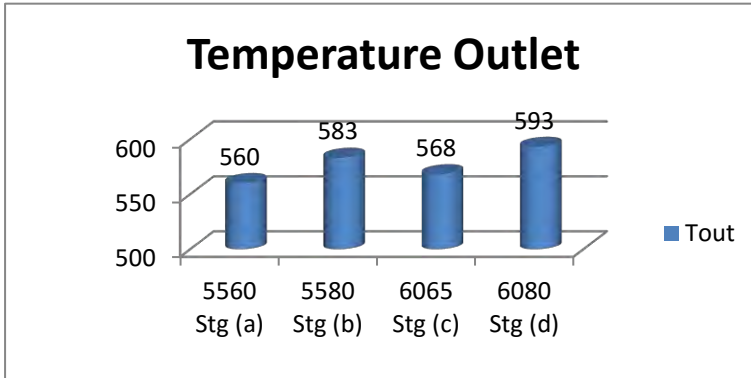
Gambar 4.9 merupakan grafik suhu outlet pada seluruh variasi pada susunan aligned. Suhu outlet terendah ada pada variasi 55/60 sebesar 573 K, variasi 60/65 sebesar 584 K, variasi 60/80 sebesar 592 K dan variasi 55/80 sebesar 595 K. Dari hasil ini diketahui jika jarak celah transversal berpengaruh pada distribusi perpindahan panas. Ketika jarak celah transversal kecil maka suhu outlet bernilai kecil. Menandakan terjadi lebih banyak perpindahan panas pada *tube banks* tersebut dibandingkan dengan model yang memiliki celah transversal besar.

4.4.2 Analisis Distribusi Suhu Lokal Pada Susunan *Tube Staggered* Secara Keseluruhan

Pada penelitian ini didapatkan data kualitatif dan kuantitatif. Data kualitatif meliputi kontur warna distribusi suhu pada *tube banks*. Sedangkan data kuantitatif meliputi suhu keluaran dari *tube banks*. Kontur warna distribusi suhu terlihat seperti gambar berikut :



Gambar 4.11 Distribusi suhu pada susunan *Staggered* dengan jarak S_L/S_T (a) 5560 (b) 5580 (c) 6065 (d) 6080



Gambar 4.12 Grafik suhu outlet pada susunan *staggered* dengan jarak SL/ST 5560, 5580, 6065, 6080

Gambar 4.9 merupakan visualisasi distribusi suhu pada susunan *tube staggered*. Suhu masukan pada *tube banks* sebesar 644 K. sedangkan suhu pada tube wall sebesar 478 K. Terlihat dari 4 gambar tersebut, yang memiliki perubahan warna signifikan serta kontur aliran suhu semakin mengecil yang ditandai dengan perubahan warna dari merah menjadi hijau ada pada gambar (a) dengan variasi 55/60. Pada gambar (a) terlihat bahwa kontur aliran suhu yang melewati celah transversal kecil memiliki nilai keluaran suhu yang kecil pula. Proses perpindahan panas secara konveksi terjadi secara maksimal pada geometri *tube* tersebut. Sedangkan Karakteristik aliran pada celah transversal dengan ukuran besar (gambar d) terlihat kontur warna merah mendominasi karena tidak ada tube yang menghalangi. Pada geometri ini memiliki variasi jarak terbesar yaitu 60/80. Terlihat pada gambar bahwa kontur aliran suhu yang memiliki warna merah ada hingga baris tube yang terakhir. Hasil visualisasi kontur suhu didukung dengan adanya data kuantitatif (gambar 4.10) yaitu suhu keluaran terendah ada pada variasi 55/60 sebesar 560 K. Variasi susunan tube bank memengaruhi suhu keluaran *tube banks*.

4.5 Perhitungan *Overall Heat Transfer Coefficient (U)*

Bagian terpenting dalam menganalisis heat exchanger adalah nilai dari koefisien perpindahan panas secara keseluruhan (*U*). Pada penelitian ini nilai overall heat transfer coefficient (*U*) didapatkan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{hi Ai} + \frac{R'' fi}{Ai} + \frac{\ln(\frac{Do}{Di})}{2\pi k L} + \frac{R'' fo}{Ao} + \frac{1}{ho Ao}$$

Dengan *i* merupakan inner dan *o* merupakan outer permukaan pipa. Didapatkan nilai overall heat transfer coefficient (*U*) sebagai berikut:

Tabel 4.1 Hasil perhitungan *overall heat transfer coefficient (U)*

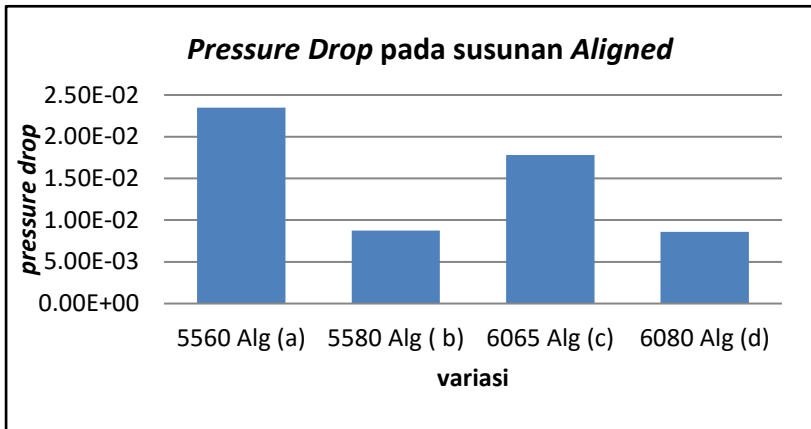
Variasi	<i>Overall Heat Transfer Coefficient (U)</i> (W/m ² K)
5560 Aligned	118.55
5580 Aligned	92.42
6065 Aligned	106.61
6080 Aligned	103.84

Tabel 4.2 Hasil perhitungan *overall heat transfer coefficient (U)*

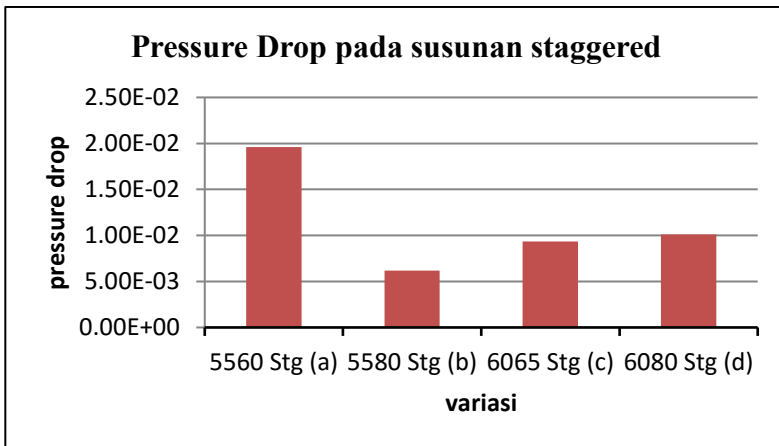
Variasi	<i>Overall Heat Transfer Coefficient (U)</i> (W/m ² K)
5560 Staggered	134.89
5580 Staggered	121.28
6065 Staggered	131.28
6080 Staggered	103.84

4.6 Analisis *Pressure Drop* pada tube banks

Pressure drop yang terjadi pada *tube banks* dipengaruhi oleh perubahan geometri pada *tube banks* tersebut. Beberapa faktor yang mempengaruhi nilai *pressure drop* adalah jumlah *tube*, massa jenis fluida yang mengalir, kecepatan fluida maksimum yang melintasi *tube*, serta faktor koreksi dan faktor gesekan dimana kedua hal tersebut dipengaruhi oleh jarak *longitudinal*, *transversal* dan *diagonal* dari *tube*. Berikut merupakan nilai *pressure drop* hasil perhitungan pada penelitian ini :



Gambar 4.13 Nilai *pressure drop* pada variasi susunan *aligned*



Gambar 4.14 Nilai *pressure drop* pada variasi susunan *staggered*

Perbedaan tekanan menyebabkan fluida dari sisi inlet mengalir menuju sisi outlet. Perubahan luas penampang yang dilalui fluida akibat konfigurasi tube secara staggered mempengaruhi tekanan didalam sistem dan kecepatan fluida. Dilihat dari gambar 4.13 dan gambar 4.14 bahwa nilai *pressure*

drop pada masing-masing variasi berbeda. Nilai pressure drop tertinggi ada pada variasi dengan jarak S_L/S_T terkecil yaitu 55/60. Variasi jarak ini terjadi pada kedua model susunan aligned dan staggered. Pada susunan aligned nilai pressure drop tertinggi sebesar 2.35×10^{-2} bars sedangkan pada susunan staggered nilai pressure drop tertinggi sebesar 1.96×10^{-2} bars. Hal ini karena nilai pressure drop sangat dipengaruhi oleh pembelokkan aliran. Semakin kecil jarak longitudinal dan transversal maka akan semakin banyak terjadi pembelokkan aliran. Selain itu hasil perhitungan memperlihatkan bahwa nilai pressure drop pada staggered lebih tinggi dari aligned. Fenomena ini terjadi karena pada susunan staggered tube tersusun membentuk pola segitiga sehingga fluida yang melewati tube seakan-akan terhalangi. Semakin besar nilai pressure drop dapat mengakibatkan nilai kecepatan fluida menjadi rendah. Besar kecilnya nilai pressure drop pada alat penukar panas menyatakan sejauh mana fluida tersebut dapat mempertahankan tekanan yang dimiliki selama fluida mengalir.

4.7 Pembahasan

Pada penelitian ini membahas mengenai *economizer* dengan susunan *tube banks aligned* dan *staggered*. Pada masing-masing susunan *tube banks* memiliki variasi jarak S_L/S_T sebanyak 4 variasi, yaitu 55/60, 55/80, 60/65, dan 60/80. Simulasi dilakukan untuk meneliti jenis susunan serta variasi jarak yang memiliki nilai koefisien perpindahan panas keseluruhan optimum. Dari hasil simulasi pada seluruh variasi baik susunan *aligned* maupun susunan *staggered* nilai kecepatan maksimal ada pada variasi jarak S_L/S_T sebesar 55/60. Pada susunan *aligned* nilai kecepatan maksimal sebesar 51.7 m/s sedangkan pada susunan *staggered* nilai kecepatan maksimal sebesar 45.6 m/s. Fenomena ini terjadi karena jarak 55/60 merupakan variasi jarak terkecil. Besarnya nilai transversal pitch (ST) akan berpengaruh pada nilai kecepatan. Sesuai dengan hukum Bernoulli jika luasan bidang yang dilewati aliran kecil maka nilai kecepatannya akan besar. Kemudian susunan staggered memiliki nilai kecepatan lebih

rendah karena susunan tube tidak sejajar sehingga menghalangi aliran yang lewat. Besarnya nilai kecepatan maksimal yang ada akan mempengaruhi nilai *Reynolds Number* dan koefisien perpindahan panas. Pada penelitian ini nilai *Reynolds Number* susunan *aligned* variasi 55/60 sebesar 43.586,03 dan susunan *staggered* variasi 55/60 sebesar 115145.3. Hasil ini sesuai dengan teori yang ada. Dengan nilai *Reynoldss Number* yang besar, maka nilai koefisien perpindahan panas juga besar. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai koefisien perpindahan panas terbesar ada pada susunan *staggered* dengan variasi 55/60 sebesar 142 W/m².K sedangkan pada susunan *aligned* variasi 55/60 nilai koefisien perpindahan panas sebesar 124 W/m².K. Fenomena ini sesuai dengan teori yang ada. Berdasarkan teori yang ada jika nilai kecepatan dan *Reynolds Number* tinggi maka nilai koefisien perpindahan panas juga semakin tinggi. Selain itu fenomena ini didukung dengan hasil simulasi yang menunjukkan suhu keluaran lebih kecil yaitu sebesar 560 K. Atau dengan kata lain perpindahan panas sebesar 84 K.

Tabel 4.3 komparasi nilai dari seluruh variasi

Variasi susunan	SL/ST	Vmax (m/s)	Re	Tout (K)	h (W/m ² K)	ΔP (bars) (10 ⁻²)	U (W/m ² K)
Aligned	5560	51.7	43586.03	573	124	2.35	118.55
	5580	45	37937.55	595	95.7	0.876	92.42
	6065	48.3	40719.63	584	111	1.78	106.61
	6080	43.4	36588.66	592	108	0.859	103.84
Staggered	5560	45.6	115145.3	560	142	1.96	134.89
	5580	29.7	74995.98	583	127	0.6.18	121.29
	6065	37	93429.34	568	138	0.933	131.28
	6080	38.2	96459.48	593	108	1.01	103.84

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan simulasi dan analisis data yang dilakukan didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Secara kualitatif didapatkan visualisasi kontur distribusi kecepatan dan distribusi suhu pada susunan tube banks aligned memiliki kontur terbaik. Begitu pula data secara kuantitatif menunjukkan pada susunan *tube banks aligned* dengan variasi jarak 55/60 memiliki distribusi kecepatan dan distribusi suhu terbaik dengan nilai kecepatan maksimal sebesar 51.7 m/s dan suhu keluaran sebesar 573 K. Pertukaran panas yang ada didalam *tube banks* sebesar 71 K. Sedangkan pada susunan tube banks *staggered* hasil terbaik ada pada variasi jarak 55/60 dengan kecepatan maksimal 45.6 m/s dan suhu keluaran sebesar 560 K. Serta pertukaran panas sebesar 84 K.
2. Model *economizer* yang memiliki nilai koefisien perpindahan panas paling optimum ada pada susunan *tube banks staggered* dengan variasi jarak 55/60 yaitu sebesar 142 W/m².K.

5.2 Saran

Saran dan beberapa rekomendasi untuk penelitian selanjutnya adalah :

1. Perlu dilakukan penelitian dengan menggunakan CFD secara 3D untuk mendapatkan hasil penelitian yang mendekati kondisi sebenarnya.
2. Perlu dilakukan penambahan variasi lain untuk mengoptimalkan perpindahan panas secara keseluruhan pada *tube banks* dengan susunan *aligned* dan *staggered*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- F.P. Incropera and D.P. Dewitt, Fundamental of Heat and Mass Transfer Third Edition, Canada: John Willey and Sons, 1990
- S. Kakac and H. Li, Heat Exchanger Selection, Rating, and Thermal Design Second Edition, New York: CRC Press, 2002
- Boehm, R.F. Design Analysis of Thermal Systems. United States: s.n 1987
- Wilcox, Dr. David C. Turbulent Modeling for CFD. California: DCW Industries, 1994
- Shaw, C.T. Using Computational Fluid Dynamics, New York: Prentice Hall, 1992
- Y.Q. Kong, dkk. Effect of continuous and alternating rectangular slots on thermo-flow performances of plain finned tube bundles in in-line and staggered configurations, China: Beijing, 2015
- Tahseen Ahmad, dkk. An overview on thermal and fluid flow characteristics in a plain plate finned and un-finned tube banks heat exchanger, Malaysia: Pahang, 2014
- T. Kuppan. Heat Exchanger Design Handbook, New York: Marcel Dekker, 2000
- Sathit Niamsuwan, dkk. A newly designed economizer to improve waste heat recovery: A case study in pasteurized milk plant, Thailand: Chulalongkorn University, 2013
- P.K. Ravindra, V.R. Raju, N.R. Investigation of improvement in boiler through incorporation of additional bank of tubes in the economizer for supercritical steam power cycle, English: Res Dev, 2012

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Kota Bojonegoro, Jawa Timur pada tanggal 02 Agustus 1994. Tamat sekolah dasar dari SDIT Luqman Al-hakim Surabaya (2006), SMPN 30 Surabaya (2009) dan SMAN 20 Surabaya (2012). Setelah tamat SMA, penulis melanjutkan studinya ke jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Bidang minat yang diambil penulis ketika menempuh perkuliahan adalah Bidang Minat Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan, serta Bidang Minat Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol. Selama menjadi mahasiswa, penulis bergabung dalam beberapa organisasi kemahasiswaan, yaitu Himpunan Mahasiswa Teknik Fisika pada periode 2013-2014 dan 2014-2015. Pengalaman *internship* yang dimiliki penulis dilakukan di PT. YTL Jawa Timur. Pada program *internship* tersebut, penulis melakukan analisis penerapan metode tuning PID Zieger Nichols pada pengendalian level HP Feedwater Heater. Penulis dapat dihubungkan melalui alamat email chusnulf47@gmail.com